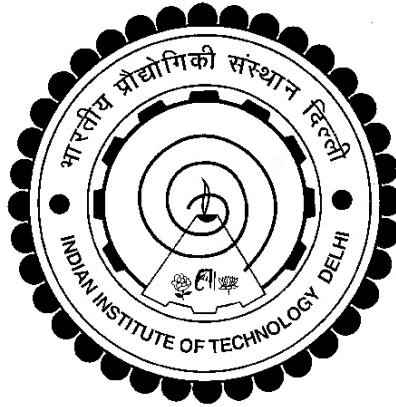


**APPLICATION OF PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA  
AND CAPILLARY PLASMA TO TERAHERTZ  
EMISSION**

**Sandeep**



**DEPARTMENT OF PHYSICS  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI  
OCTOBER 2024**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**APPLICATION OF PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA  
AND CAPILLARY PLASMA TO TERAHERTZ  
EMISSION**

by

**SANDEEP**

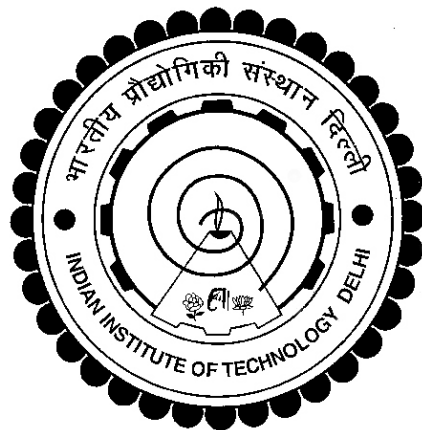
**DEPARTMENT OF PHYSICS**

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of

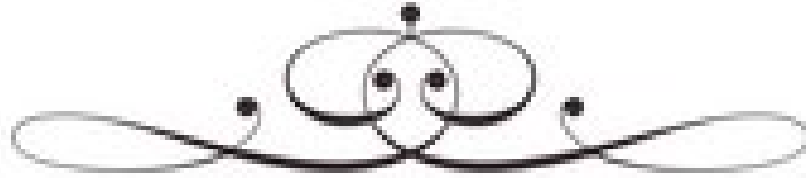
*Doctor of Philosophy*

to the

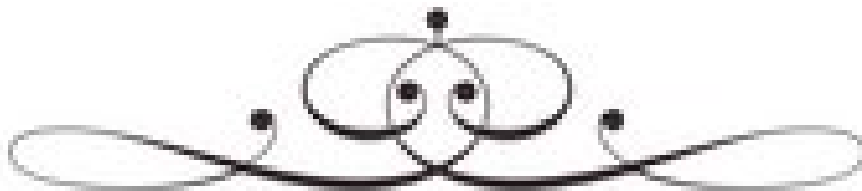


**Indian Institute of Technology Delhi**

**October 2024**



**Dedicated to  
my  
Beloved Parents,  
Wife  
and  
Daughter**



# Certificate

This is to certify that the thesis entitled “**Application of Photoconductive Antenna and Capillary Plasma to Terahertz Emission**” being submitted by **Mr. Sandeep** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the Degree of *Doctor of Philosophy*, is a record of bona fide research work carried out by him under my supervision. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree. The results contained in this thesis have not been submitted in part or full to any other university or institute for the award of any degree or diploma. I approve the thesis for the award of the aforesaid degree.

**Prof. Hitendra Kumar Malik**

(Supervisor)

Department of Physics

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016

**October 2024**

# Acknowledgements

*I would like to convey my appreciation to you to Prof. Hitendra K. Malik, Department of Physics, IIT Delhi, for their great direction, constant inspiration, motivation, and support during our quest. It is greatly valued. that they provided critical opinions while we were having the discussions. Their scientific assistance, understanding, and many perceptive comments and ideas have helped this work to assume its current form.*

*I owe much to Prof. Amita Das, Department of Physics, IIT Delhi, for his general assistance and suggestions. As members of the Student Research Committee, Profs. Vikrant Saxena and Harish Kumar deserve my thanks as well for their insightful remarks and recommendations.*

*I am so appreciative to everyone in my group, Dr. Dimple Sharma, Rajat Dhawan, Dr. Munish Garg, Dr. Sonu, Dr. Manish, Dr. Rashmi, Dr. Aparna, Dr. Yatindra and Mr. Dhananjay, Mr. Deepak, Mr. Shubhajit, Mr. Gaurav, Mr. Mohit, Mr. Rakesh, Mr. Shailesh, Mr. Harsh and Mr. Shivam for their assistance and cooperation during reviewing the study.*

*I want to express my sincere thanks to Deen Dayal Upadhyaya College, University of Delhi, my parent organization, for giving me the chance to carry out this research. Yet, the true pillars of this journey have been my dear mother, Mrs. Amrit, and my revered late father, Shri Jagat Ram Jaggi, whose blessings and values have guided me throughout. My supportive brother, Dr. Narender Kumar, my cherished sister, Mrs. Rajshree, and my devoted wife, Mrs. Jaspreet, have provided the unwavering love and encouragement that have made this accomplishment possible. In addition, I am eternally grateful to my darling daughter, Saara Jaggi, and all those who have played significant roles in shaping my life, both past and present. Their collective strength and sacrifice are etched in my heart, and I shall carry their memories and love with me for the rest of my life.*

**Sandeep**

# Abstract

In this thesis, linear and non-linear phenomena investigate the process by which certain materials are affected by high-power lasers (i.e. GaAs, graphene, BK4). One of the main lines is understanding Terahertz (THz) generation using photoconductive antennas, as well as THz waves that are generated in the acoustic region. Post-generation, the THz waves will be directed by the stimulation of surface plasma waves.

A theoretical framework has been developed for generating THz radiation out of an intricate utilizing laser-illuminated GaAs construction. When a laser beam impinges on GaAs it creates carriers inside the material. These carriers generate a transient current, averaging over picosecond timescales under the electric field. The circulating current exhibits dipole like behavior, resulting in the production of THz waves from the GaAs array is estimated by employing antenna theory of the photoconductive antenna especially about electron mobility during current density rise. The discrete dynamical oscillator array subsequently emits long-range phase-locked THz waves, resulting in an ensemble as a whole acting as a phased-array dipole antenna. When a laser hits the GaAs material under bias voltage conditions, we can define Keldysh parameter so that it helps to know how many electron-hole pairs get produced per cycle.

Moreover, the study suggests a stronger optimization of the photoconductive antenna approaching to perfect device for fully coherent THz emitter even under magnetic field. Magnetic fields enhance the intensity of radiation and provide greater tunability of its frequency, enhancing the system performance of THz. Because the magnetic field causes carriers to rotate before they reach the corners, it increases their time in double layers resulting in creation of high-frequency pulses and greatly enhancing radiation power.

Finally, the research investigates increased THz-radiation by periodic GaAs structures in interaction with graphene. Indeed, there is a critical function for graphene's interaction with surface plasma wave excitation in improving the emission of THz radiation. Upon laser incidence on a GaAs substrate with transverse graphene strip, long. current is created during the contact of radiation (on beam axis) and short one due to action of PC antenna laser influence. This leads to an amplified THz radiation amplitude through such a process, which involves graphene.

Once THz radiation is generated, the task at hand is to effectively direct it. This is achieved by focusing a Terahertz beam into a waveguide that surrounds a small GaAs semiconductor between two parallel metal plates, it is possible to generate surface plasma waves (SPW) seated at the boundary between the metallic and semiconductor materials. it is observed that the real component of the propagation vector exhibits a consistent rise as the frequency of the SPW rises, while the imaginary component gradually decreases. When studying the pulse distortion caused by the Terahertz wave (THz), scientists have discovered that it produces components with varying phase velocities.

Additionally, the thesis explores an alternative way to generate THz radiation with theories using a plasma waveguide. This method has utilized a non-linear combination of two lasers within a plasma capillary to produce THz radiation. The TM-mode in plasma capillary is considered and investigated under laser field where it differs to that of metallic waveguide. Inside the plasma, the refractive index is less than one, preventing waveguiding, but the density profile can be adjusted to allow laser propagation through the waveguide. Non-linear mixing of two lasers within this waveguide creates ripples that satisfy phase-matching conditions. The resulting non-linear oscillatory velocity of electrons, when coupled with perturbed density, generates non-linear current density, which in turn produces THz radiation. A transverse ponderomotive force is applied, which

occurs in a field that oscillates quickly but has an amplitude that changes slowly. The presence of non-linear mixing necessitates the creation of ripples to facilitate THz wave generation.

Finally, the thesis examines a different approach to generating THz radiation by interacting a femtosecond laser pulse with dense plasma. The focus is on developing a theoretical model to explain the generation of strong Terahertz acoustic waves observed experimentally. The model is based on the hydrodynamic processes triggered by rapid plasma heating. This paper presents an alternate rationale for the empirical detection of powerful Terahertz acoustic waves that are created in dense plasma formed by laser emissions. This experiment utilized a 20 TW laser that employed chirped pulse amplification (Ti: sapphire, 30 fs, 800 nm), focused on a solid foil target utilizing a parabolic mirror inclined off-axis. The Terahertz (THz) acoustics phenomenon was observed on a picosecond timescale when a dense plasma is interacted with a femtosecond laser operating at a  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> intensity. In this study, we will develop a theoretical framework to explain this laser-plasma interaction and the resulting radiation generation.

# सारांश

इस शोध में रैखिक और गैर-रैखिक घटनाओं के माध्यम से कुछ पदार्थों (जैसे गैलियम आर्सेनाइड, ग्राफीन, बीके4) पर उच्च-शक्ति किरणों के प्रभाव का अध्ययन किया गया है। मुख्य उद्देश्यों में से एक प्रकाशचालक एंटेना का उपयोग करके टेराहर्ट्ज़ तरंगों का निर्माण समझना है, साथ ही ध्वनिक क्षेत्र में उत्पन्न टेराहर्ट्ज़ तरंगों का अध्ययन करना है। निर्माण के बाद, टेराहर्ट्ज़ तरंगों को सतह प्लाज़्मा तरंगों की प्रेरणा से निर्देशित किया जाएगा।

एक सैद्धांतिक ढांचा विकसित किया गया है, जो किरण-प्रकाशित गैलियम आर्सेनाइड संरचना का उपयोग करके टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न करता है। जब किरण गैलियम आर्सेनाइड पर गिरती है, तो यह माध्यम के भीतर वाहक उत्पन्न करती है। ये वाहक विद्युत क्षेत्र के अंतर्गत पिकोसेकंड समय-सीमा में एक क्षणिक धारा उत्पन्न करते हैं। यह घूर्णन धारा द्विध्रुवीय व्यवहार प्रदर्शित करती है, जिससे श्रेणी बद्ध गैलियम आर्सेनाइड से टेराहर्ट्ज़ तरंगों का निर्माण होता है, जिसे प्रकाशचालक यंत्र के सिद्धांत द्वारा, विशेष रूप से धारा घनत्व में वृद्धि के दौरान इलेक्ट्रॉन गति के संदर्भ में अनुमानित किया गया है। इसके बाद, असतत गतिशील दोलन यंत्र समूह लंबी दूरी की चरण-संयोजित टेराहर्ट्ज़ तरंगों का उत्सर्जन करता है, जिससे यह संपूर्ण समूह एक चरणबद्ध द्विध्रुवीय यंत्र के रूप में कार्य करता है। जब किरण गैलियम आर्सेनाइड सामग्री पर पूर्वाग्रह विद्युत की स्थिति में पड़ती है, तो हम केल्वीन मापदंड को परिभाषित कर सकते हैं, जिससे यह जानने में सहायता मिलती है कि प्रत्येक चक्र में कितने इलेक्ट्रॉन-छिद्र युग्म उत्पन्न होते हैं।

अतः, अध्ययन से सुझाव मिलता है कि प्रकाशचालक यंत्र का बेहतर अनुकूलन किया जाए, ताकि यह एक पूर्ण समन्वित टेराहर्ट्ज़ उत्सर्जक उपकरण के रूप में कार्य कर सके, यहां तक कि चुंबकीय क्षेत्र में भी। चुंबकीय क्षेत्र विकिरण की तीव्रता को बढ़ाता है और इसकी आवृत्ति की अधिक समायोजन क्षमता प्रदान करता है, जिससे टेराहर्ट्ज़ प्रणाली की कार्यक्षमता में सुधार होता है। चूंकि चुंबकीय क्षेत्र आवेशों को कोनों तक पहुंचने से पहले घुमाता है, यह उन्हें दोहरी परतों में अधिक समय व्यतीत करने के लिए प्रेरित करता है, जिससे उच्च-आवृत्ति वाली पल्स का निर्माण होता है और विकिरण शक्ति में बड़ी वृद्धि होती है।

अंततः, शोध ने ग्राफीन के साथ अंतःक्रिया करने वाली आवर्तक गैलियम आर्सेनाइड संरचनाओं द्वारा टेराहर्ट्ज़ विकिरण की वृद्धि का अध्ययन किया है। वास्तव में, ग्राफीन की सतह प्लाज्मा तरंग उत्तेजना के साथ अंतःक्रिया में टेराहर्ट्ज़ विकिरण के उत्सर्जन में सुधार के लिए एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। जब गैलियम आर्सेनाइड सबस्ट्रेट पर लंबवत ग्राफीन पट्टी के साथ किरण गिरती है, तो विकिरण के संपर्क (किरण धुरी पर) के दौरान अधिक धारा उत्पन्न होती है, और प्रकाश चालक यंत्र के लेज़र प्रभाव के कारण अल्प धारा उत्पन्न होती है। यह एक ऐसे प्रक्रिया के माध्यम से टेराहर्ट्ज़ विकिरण की आवृत्ति में वृद्धि का कारण बनता है, जिसमें ग्राफीन शामिल होता है।

एक बार जब टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न हो जाता है, तो उसे प्रभावी ढंग से निर्देशित करना आवश्यक होता है। यह एक टेराहर्ट्ज़ किरण को एक तरंग मार्ग में केंद्रित करके किया जाता है, जो दो समानांतर धातु प्लेटों के बीच एक छोटे गैलियम आर्सेनाइड अर्धचालक के चारों ओर स्थित होता है। इससे धातु और अर्धचालक माध्यम के बीच की सीमा पर सतह प्लाज्मा तरंगों उत्पन्न करना संभव होता है। यह देखा गया है कि प्रसार वेक्टर का वास्तविक घटक जैसे-जैसे सतह प्लाज्मा तरंगों की आवृत्ति बढ़ती है, निरंतर वृद्धि प्रदर्शित करता है, जबकि काल्पनिक घटक धीरे-धीरे घटता है। जब टेराहर्ट्ज़ तरंग के कारण होने वाले स्पंदन विरूपण का अध्ययन किया जाता है, तो वैज्ञानिकों ने पाया है कि यह भिन्न चरण गति वाले घटकों का उत्पादन करता है।

इसके अतिरिक्त, शोध में प्लाज्मा तरंग मार्ग का उपयोग करके टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न करने के लिए एक वैकल्पिक तरीके का अन्वेषण किया गया है। इस विधि में प्लाज्मा कैपिलरी के भीतर दो लेज़रों का गैर-रेखीय संयोजन किया गया है ताकि टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न किया जा सके। प्लाज्मा कैपिलरी में TM-मोड पर विचार किया गया है और इसे लेज़र क्षेत्र के अंतर्गत जांचा गया है, जहाँ यह धातु तरंग मार्ग से भिन्न होता है। प्लाज्मा के भीतर, अपवर्तक सूचकांक एक से कम होता है, जो तरंग मार्गन को रोकता है, लेकिन घनत्व प्रोफ़ाइल को समायोजित किया जा सकता है ताकि तरंग मार्ग के माध्यम से लेज़र प्रसार हो सके। इस तरंग मार्ग के भीतर दो लेज़रों का गैर-रेखीय मिश्रण तरंगों को उत्पन्न करता है जो चरण-समायोजन की दशाओं को पूरा करता है। परिणामी गैर-रेखीय दोलन गति, जब विकृत घनत्व के साथ जोड़ी जाती है, तो गैर-रेखीय धारा घनत्व उत्पन्न करती है, जो बदले में टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न करती है। एक अनुप्रस्थ पॉन्डरोमोटिव बल लागू किया जाता है,

जो एक ऐसे क्षेत्र में होता है और तेजी से दोलन करता है लेकिन जिसका आयाम धीरे-धीरे बदलता है। गैर-रेखीय मिश्रण की उपस्थिति टेराहर्ट्ज़ तरंग उत्पन्न करने के लिए तरंगों के निर्माण की आवश्यकता होती है।

अंततः, शोध एक अलग दृष्टिकोण की जांच करता है जिससे टेराहर्ट्ज़ विकिरण उत्पन्न किया जा सके, जो कि फेम्टोसेकंड लेज़र पल्स और घनत्व प्लाज़्मा के अंतःक्रिया के माध्यम से किया जाता है। ध्यान एक सैद्धांतिक मॉडल विकसित करने पर है जो प्रयोगात्मक रूप से देखे गए मजबूत टेराहर्ट्ज़ ध्वनिक तरंगों के उत्पन्न होने की व्याख्या करता है। यह मॉडल तेजी से प्लाज़्मा हीटिंग द्वारा उत्प्रेरित हाइड्रोडायनामिक प्रक्रियाओं पर आधारित है। यह लेख शक्तिशाली टेराहर्ट्ज़ ध्वनिक तरंगों की अनुभवजन्य पहचान के लिए एक वैकल्पिक तर्क प्रस्तुत करता है, जो लेज़र उत्सर्जन द्वारा निर्मित घनत्व प्लाज़्मा में उत्पन्न होती हैं। इस प्रयोग में 20 टेरावॉट लेज़र का उपयोग किया गया, जिसमें चिर्ड पल्स संवर्धन (Ti: सफायर, 30 फेम्टोसेकंड, 800 नैनोमीटर) किया गया, जो एक ठोस फॉयल लक्ष्य पर केंद्रित था, जिसमें एक पाराबोलिक दर्पण का उपयोग किया गया था जो ऑफ-एक्सिस झुका हुआ था। जब घनत्व प्लाज़्मा को एक फेम्टोसेकंड लेज़र के साथ  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> तीव्रता पर जोड़ा गया, तो टेराहर्ट्ज़ ध्वनिक घटना पिकोसेकंड समय-सीमा पर देखी गई। इस अध्ययन में हमने इस लेज़र-प्लाज़्मा अंतःक्रिया और इसके परिणामस्वरूप विकिरण उत्पन्न करने के लिए एक सैद्धांतिक ढांचा विकसित किया है।

# Contents

<b>Certificate</b>	<b>i</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Saransh</b>	<b>vi</b>
<b>Contents</b>	<b>ix</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b>	<b>1-34</b>
1.1 Introduction to THz Photoconductive Antenna	1
1.1.1 Theory of Terahertz Photoconductive Antennas (PCAs)	4
1.1.2 Large Area Emitters	7
1.1.3 Large Aperture Dipoles	8
1.1.4 Interdigitated Electrodes	9
1.1.5 Dipole Arrays	12
1.2 Ionization and Plasma	13
1.3 Ionization Processes	15
1.3.1 Multi-photon Ionization	16
1.3.2 Tunnel Ionization	17
1.4 Wave Propagation in Inhomogeneous Plasma	18
1.5 Ponderomotive Force	20

1.6	Surface Plasma Wave	21
1.6.1	Dispersion Relation of Surface Plasma Wave	21
1.6.2	Excitation of Surface Plasma Waves	22
1.7	Plasma Waveguide	25
1.7.1	Capillary Plasma Waveguides	26
1.8	Objectives and Outline of Thesis	27
1.9	Chapter-wise Summary of Thesis	29
<b>Chapter 2</b>	<b>Terahertz Radiation Generation by Laser Interaction with a Periodic Array of GaAs Structure</b>	<b>35-42</b>
2.1	Introduction	35
2.2	Electron-Hole Pair Production	37
2.3	Terahertz Radiation Generation	40
2.4	Concluding Remarks	42
<b>Chapter 3</b>	<b>THz generation by a periodic array of a photoconductive antenna of GaAs material in the presence of a magnetic field</b>	<b>43-53</b>
3.1	Introduction	43
3.2	Current Density due to Photoconductive Antenna	44
3.3	Radiated THz power	50
3.4	Conclusions	53
<b>Chapter 4</b>	<b>Enhancement of Terahertz Radiation due to Excitation of SPW on Graphene Strip coated on GaAs Structure</b>	<b>55-67</b>
4.1	Introduction	55

4.2	THz Graphene Plasmonic in Graphene Strip Coated on GaAs Material	59
4.3	THz Surface Plasmonics Generation in Graphene strip coated on GaAs Material	64
4.4	Concluding Remarks	67
<b>Chapter 5 Excitation of THz plasmonic eignmode of parallel plain waveguide by using GaAs material</b>		<b>69-83</b>
5.1	Introduction	69
5.2	Terahertz Eigen Modes of a Semiconductor Slab	71
5.3	Absorption	79
5.4	Distortion	81
5.5	Conclusions	83
<b>Chapter 6 THz generation by non-linear mixing of two lasers in a capillary plasma waveguide</b>		<b>85-96</b>
6.1	Introduction	85
6.2	TM Eigen Mode of a Plasma Cylinder	87
	6.2.1 Relation between $E_r$ and $E_z$	88
6.3	Nonlinear Mixing	90
	6.3.1 Phase Matching	91
	6.3.2 Plasma Response	92
6.4	Terahertz Field	93
6.5	Discussion	96

<b>Chapter 7</b>	<b>Theoretical modelling of Terahertz acoustic wave generated by a femtosecond laser pulse in a dense plasma having density gradient</b>	<b>97-109</b>
7.1	Introduction	97
7.2	Calculations for Langmuir Wave and Rise in Temperature	99
7.3	Ion acoustic wave evolution in THz Frequency Range	106
7.4	Concluding Remarks	109
<b>Chapter 8</b>	<b>Summary and Scope of the Work</b>	<b>111-114</b>
8.1	Summary of Thesis Work	111
8.2	Future Scope	114
<b>References</b>		<b>115-132</b>
<b>Brief Biodata of author</b>		<b>133</b>

# List of Figures

---

<b>Figure Number</b>	<i>Description</i>
<b>1.1</b>	<b>A spectrum of electromagnetic radiation.</b>
<b>1.2</b>	<b>Average power vs. Frequency in THz</b>
<b>1.3</b>	<b>Illustration depicting the generation of pulsed terahertz waves by a photoconductive antenna. (top) Upon receiving an optical pulse with a pulse width of femtoseconds, the photoconductor produces a transient photocurrent that supplies power to the antenna and emits a pulse with a wide frequency range of terahertz (THz).</b>
<b>1.4</b>	<b>(a) A terahertz array antenna schematic. A side view of an array of terahertz antennas.</b>
<b>1.5</b>	<b>Schematic diagrams of strong field ionization events. (a) Field free Coulomb potential around the nucleus. (b) Multiphoton Ionization shown with an Above-Threshold Ionization event. (c) Tunnel Ionization event. (d) Over Barrier Ionization event.</b>
<b>1.6</b>	<b>The electric field becomes P-polarized when it is parallel to the yz-plane, the electromagnetic wave's plane of incidence, and S-polarized when it is perpendicular to the yz-plane.</b>
<b>1.7</b>	<b>Schematic of pondermotive force</b>

- 1.8 Geometry of surface plasma wave propagation at metal-dielectric interaction**
- 1.9 Plasma wave dispersion curves on the surface.**
- 1.10 Excitation of SPW using the Kretschmann setup**
- 1.11 Use of diffraction gratings for phase matching light to SPW**
- 2.1 Visualization of terahertz (THz) emission by subjecting a periodic array of photoconductive antennas to laser irradiation.**
- 2.2 Current density plot in frequency domain**
- 2.3 Current density plot in frequency domain**
- 2.4 when  $l = 3\mu\text{m}$ ,  $d = 0.8\mu\text{m}$ ,  $b = 1\mu\text{m}$ ,  $\mu = 2.62$ ,  $\vartheta = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $E_b = 20 \text{ kV/cm}$ ,  $M1 = 50$ , and  $M2 = 20$ , the relationship between THz power (nW) and frequency is shown.**
- 3.1 Illustration depicting the production of terahertz (THz) radiation by a systematic configuration of photoconductive antennas under the influence of a laser and a magnetic field.**
- 3.2 Current density plot in time domain along y and x axis for  $\alpha = 0.5$**
- 3.3 Current density plot in frequency domain along y-direction (a) and along x-direction (b).**
- 3.4 When  $l = 3\mu\text{m}$ ,  $d = 0.8\mu\text{m}$ ,  $b = 1\mu\text{m}$ ,  $\mu = 2.62$ ,  $\vartheta = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $E_b = 20 \text{ kV/cm}$ ,  $M1 = 50$ , and  $M2 = 20$ , the x-direction power (nW) emitted by the THz system vs frequency.**

- 4.1 When  $l = 3\mu\text{m}$ ,  $d = 0.8\mu\text{m}$ ,  $b = 1\mu\text{m}$ ,  $\mu = 2.62$ ,  $\vartheta = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $E_b = 20 \text{ kV/cm}$ ,  $M_1 = 50$ , and  $M_2 = 20$ , the y-direction power (nW) emitted by the THz system vs frequency.
- 4.2 Schematic of surface plasmon wave (SPW) excitation using a laser on a graphene substrate.
- 4.3 The normalized graphene strip  $\frac{L\omega_p}{c} = 0.1, 0.2$  and  $0.3$  Investigates the relationship between the dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$  and the dimensionless propagation vector vs the dimensionless propagation vector  $\frac{k_z c}{\omega_p}$ .
- 4.4 Analysis of the relationship between dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$  and dimensionless propagation vector  $\frac{L\omega_p}{c}$  in the normalised graphene strip  $\frac{k_z c}{\omega_p} = 1, 2, 3$ .
- 4.5 THz surface wave amplitude plot in time domain
- 5.1 THz surface wave amplitude plot in frequency domain
- 5.3 Illustration of a planar structure that enables the propagation of THz surface plasma waves
- 5.2 The prerequisite for the jump on the auxiliary magnetic field  $H_y$  normal component at  $z = a$ .

- 5.3 Plotting the dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$  against the dimensionless propagation vector  $\frac{k_z c}{\omega_p}$  in the fundamental mode of the beam reveals an interesting variation. The parameters  $\frac{m}{m_m} \frac{n_{0m}}{n_0} \frac{d\omega_p}{c} = 5$ .
- 5.4 Changes in the fundamental beam mode for  $\frac{a\omega_p}{c} = 0.2$  in relation to the dimensionless propagation vector  $\frac{k_z c}{\omega_p}$  and the dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$
- 5.5 Illustration of a planar structure that can support THz surface plasma waves
- 5.6 Plotting the dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$  against the dimensionless propagation vector  $\frac{k_z c}{\omega_p}$  in the fundamental mode of the beam reveals an interesting variation. The parameters  $\frac{m}{m_m} \frac{n_{0m}}{n_0} \frac{d\omega_p}{c} = 5$ .
- 5.7 Plotting the dimensionless frequency  $\frac{\omega}{\omega_p}$  against the dimensionless propagation vector  $\frac{k_z c}{\omega_p}$  in the fundamental mode of the beam reveals an interesting variation. The parameters  $\frac{a\omega_p}{c} = 0.2$ .
- 5.8 Plot of normalized real part of dispersion relation for SPW in waveguide for  $\frac{a\omega_p}{c} = 0.30, 0.32 \text{ and } 0.35$  and  $\epsilon_r = 9$
- 5.9 Plot of normalized imaginary part of dispersion relation for SPW in waveguide for  $\frac{a\omega_p}{c} = 0.30, 0.4 \text{ and } 0.5$  and  $\epsilon_r = 9$

- 5.10 Variation of the ration of the amplitude with normalized time for different value of z for SPW.
- 6.1 Schematic of beat wave over a hollow plasma cylinder of radius  $a$ .
- 6.2 Variation of normalized  $\frac{A(r)}{A_0}$  vs r in arb. unit
- 6.3 Plotting the variation of normalized  $k_z$  against normalised terahertz frequency  $\omega$  for different values (1, 2, 5) of normalised laser spot  $r_0$ .
- 6.4 Plotting the variation of  $q$ , normalised frequency  $\omega$ , and laser spot  $r_0$ .
- 6.5 Plotting the variation of normalized amplitude  $\frac{A_z}{A_1}$  against normalised frequency  $\omega/\omega_{p0}$  for different values of  $n_\Omega/n_0 = 0.1, 0$ . for the THz wave.
- 7.1 Schematic of the turning point and mode conversion layer
- 7.2 Thermal energy of electrons as function of parameter  $\xi = \frac{z}{\lambda_{es}}$
- 7.3 The amplitude of plasma potential,  $\phi$  as a function of normalized distance,  $\xi = \frac{z}{\lambda_{es}}$
- 7.4 The dimensionless propagation vector  $\frac{v_{th}k_i}{\omega_p}$  variation with dimensionless frequency  $\frac{\omega_p}{\omega}$